

Giovanni Benvenuti[°], Antonio Galgaro[°], Luigi Tosi^{°°}

**INDAGINE GEOELETTRICA PER LA
VALUTAZIONE DELL'INTRUSIONE SALINA
NEGLI ACQUIFERI COSTIERI DEL
COMPRESORIO MERIDIONALE VENEZIANO***

Technical Report n. 222

Giugno 1998

[°] Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica, Università degli Studi di Padova.

^{°°} Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, CNR, Venezia.

* Lavoro svolto nell'ambito del Progetto Strategico "AMBIENTE E TERRITORIO", Area Tematica "IMPATTO CLIMATICO" dall'U.O. 03, Responsabile Dott. Laura Carbognin.

INDICE

Riassunto.....	3
Abstract.....	3
INTRODUZIONE	4
ASSETTO GEOLOGICO	7
METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE	10
LA SERIE ELETTROSTRATIGRAFICA E LE SEZIONI INTERPRETATIVE	14
CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE	24
Ringraziamenti.....	26
BIBLIOGRAFIA.....	27

INDAGINE GEOELETTRICA PER LA VALUTAZIONE DELL'INTRUSIONE SALINA NEGLI ACQUIFERI COSTIERI DEL COMPRESORIO MERIDIONALE VENEZIANO

GEOELECTRICAL INVESTIGATION AS A TOOL TO STUDY SALT WATER INTRUSION IN COASTAL AQUIFERS OF THE SOUTHERN VENETIAN REGION

Riassunto

Attraverso l'indagine geoelettrica è stata eseguita una prima valutazione dell'estensione dell'intrusione salina marina e lagunare nel settore meridionale del comprensorio veneziano.

Nel settore costiero, caratterizzato da dune e cordoni litoranei, è presente una falda freatica con acqua "dolce" fino ad una profondità di anche una decina di metri e l'intrusione salina coinvolge i terreni sottostanti fino ad oltre 70 metri.

Nell'entroterra, la soggiacenza del territorio rispetto al livello marino, i pompaggi con idrovore e la rete idrografica pensile in comunicazione col mare sono fattori che riducono a pochi metri, ed in alcune zone annullano, lo spessore della falda dolce superficiale e consentono al cuneo salino di raggiungere la base dei terreni coltivati.

Abstract

A preliminary evaluation of the salt water intrusion in coastal aquifers of the southern Venetian region, is here made using geoelectrical investigation.

The results of the analyses show that the two dimensional extent of the saline contamination is mainly related to the geomorphology of this area.

In the littoral sector, characterized by a mean ground elevation of two meters above mean sea level (sand dunes and paleolittoral strips), a phreatic fresh water body is present and salt water contamination involves aquifers and aquitards from 10 to 70 m deep.

In the inland, the ground level is about 2-3 m below mean sea level; the water pumping in the reclaimed lands and the marine water seepage in the rivers during high tides are among the factors that seriously reduce the fresh water body and that allow salt water to contaminate the agricultural soils.

INTRODUZIONE

Questo studio è parte di una ricerca multidisciplinare che ha come scopo la valutazione dell'intrusione salina nel sistema acquifero costiero veneziano e della sua evoluzione a seguito di variazioni del livello medio del mare e meteorologiche nonché dello sfruttamento antropico delle acque di falda.

L'obiettivo di questo lavoro è quello di identificare i terreni coinvolti dalla contaminazione d'acque saline e di stimare l'estensione di questo fenomeno.

L'area di studio comprende il settore litoraneo di Sottomarina, quello tra le foci dei fiumi Brenta-Bacchiglione e Adige ed il territorio delimitato a Sud dall'allineamento S. Anna – Dolfina, ad Ovest dal Canale Nuovo dei Cuori e a Nord dalla laguna (Fig.1).

Il problema della salinizzazione delle acque sotterranee, presente in tutto questo territorio, è particolarmente grave nei settori retrostanti la fascia litoranea, quelli interessati dalle bonifiche.

Qui l'intrusione d'acque saline dovute alla vicinanza del mare e della laguna è favorita anche da altri fattori quali: la quota critica del territorio, che è anche di tre metri soggiacenti il livello medio del mare, ed i pompaggi delle idrovore, indispensabili per mantenere il franco di bonifica.

Ulteriore fattore di contaminazione salina è la dispersione dai fiumi e canali di acqua marina e lagunare risalita durante la fase crescente di marea e/o nei periodi di magra. L'acqua salata può risalire la foce del Fiume Adige per circa quindici chilometri (fino a S. Pietro di Cavarzere) e quella del Fiume Bacchiglione per una ventina (fino a Correzzola).

Oltre le falde superficiali (fino a 70-100 m), pur se con modalità e cause diverse, possono essere contaminate da acque saline anche quelle profonde¹. Queste infatti, risentono del richiamo di acque fossili salate presenti in tutto il comprensorio veneziano, a seconda dei settori, già a partire da 250-300 m (C.N.R., 1971; Ministero dei Lavori Pubblici, 1973; Alberotanza e Serandrei, 1974).

¹ Una indagine condotta dalla Provincia di Venezia nel territorio meridionale, attualmente in corso, ha evidenziato la presenza di acque salate a profondità di 180-200 m (Comunicazione del responsabile della ricerca il Dott. A. Vitturi).

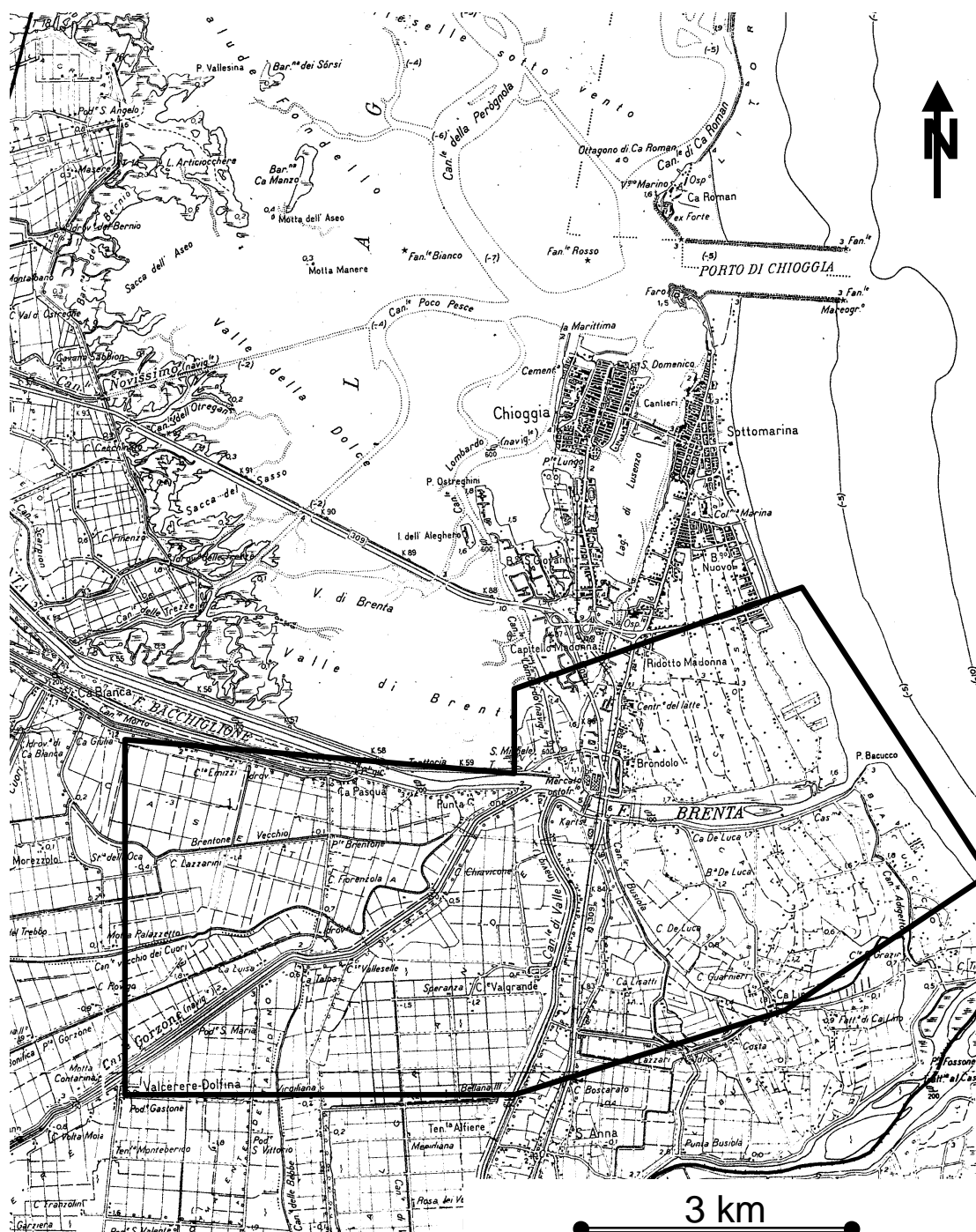


Fig. 1: inquadramento dell'area di studio

L'approvvigionamento idrico, qui fornito per irrigazione da una fitta rete di canali gestita dai Consorzi di Bonifica e per gli altri usi dall'acquedotto, è stato messo in crisi più volte sia a causa dell'ingressione persistente di acque marine nei canali di irrigazione sia per la crescente domanda di acqua per

l'attività turistica-alberghiera nel settore litoraneo che ha limitato la fornitura acquedottistica in alcuni settori dell'entroterra meno privilegiati.

In previsione di un aumento del fabbisogno idrico per il crescente interesse economico che riveste quest'area, nonché per far fronte alle emergenze che seppur occasionali creano notevoli disagi alla popolazione, si rende necessario uno studio che valuti la possibilità di integrare le attuali fonti di approvvigionamento idrico con emungimenti "occasional" di acque dolci sotterranee che non comportino un impatto ambientale negativo nel territorio aggravando l'intrusione salina e la già critica situazione altimetrica del territorio aumentandone i tassi di subsidenza (Carbognin et al., 1974, 1977, 1981, 1987; Gatto e Carbognin, 1981; Carbognin, 1987; Carbognin et al., 1994; Carbognin e Tosi, 1995; Carbognin et al., 1995a, 1995b).

Per ottenere le informazioni idrogeologiche del sottosuolo e indicazioni sulla presenza di acque e sulla loro salinizzazione, in questo lavoro sono utilizzate le indagini geofisiche col metodo geoelettrico dei sondaggi elettrici verticali (S.E.V.). Queste indagini, ben note in letteratura ed applicate in una vasta casistica mondiale per lo studio dell'intrusione salina nelle aree costiere, sono di provata efficacia e di maggior economicità rispetto alle indagini dirette in pozzi di nuova esecuzione. Nel comprensorio veneziano, un'indagine di questo tipo ha già fornito in passato utili indicazioni sulle strutture idrogeologiche dell'area circumlagunare (Benvenuti et al., 1973; Ministero dei Lavori Pubblici, 1974).

ASSETTO GEOLOGICO

Lungo la fascia litoranea, i primi 20-25 m di terreno appartengono alla deposizione marina-lagunare olocenica e sono costituiti da sabbie grossolane, per uno spessore di circa 8-10 m, seguite da limi argillosi intercalati da sottili livelli sabbiosi.

Al di sotto, il tetto della serie pleistocenica è rappresentato da un livello discontinuo di argilla continentale sovraconsolidata ² (Gatto e Preatello, 1974; Gatto 1980; Tosi, 1994a; Bonardi e Tosi, 1994, 1995a) o, in assenza di questo da sabbie fluviali, limi e argille palustri (Tosi, 1994b; Bonardi e Tosi, 1995b).

La successione litostratigrafica appena descritta presenta frequenti variazioni bidimensionali che spesso ne complicano l'interpretazione; una rappresentazione esemplificativa di tale variabilità è schematizzata dai rapporti stratigrafici tra le serie olocenica e tardo-pleistocenica (superiore) lungo una sezione posizionata qualche chilometro più a nord dell'area in esame, nel bacino di Malamocco (Fig. 2).

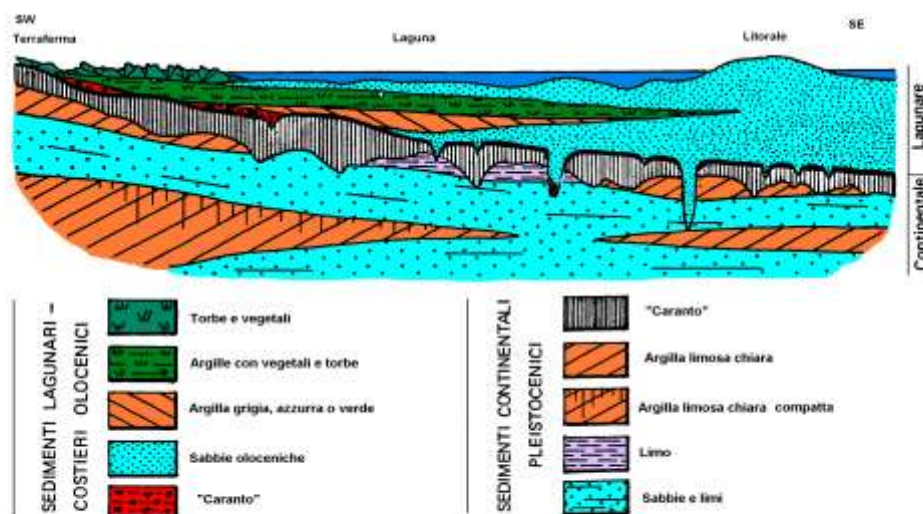


Fig. 2: rappresentazione schematica dei rapporti litostratigrafici delle deposizioni tardo-pleistocenica ed olocenica lungo una sezione litorale-laguna terraferma (da Gatto e Preatello, 1974)

² Questa argilla chiude la serie pleistocenica ed è localmente nota col nome di "caranto". Si tratta probabilmente di un paleosuolo che ha subito, a seguito di un'esposizione subaerea con clima arido, un processo di sovraconsolidazione.

Più in basso, sono presenti: da circa -25 a -35 m, sabbie con frequenti intercalazioni limose; da -35 a -50 m alternanze di argille, limi argillosi e torbe. Infine tra i -50 e -70 m si ritrovano nuovamente sabbie più o meno limose.

Questa successione stratigrafica è quella tipica del settore litoraneo di Chioggia-Sottomarina (Gatto et al., 1976; Gatto, 1980) mentre spostandosi dalla costa verso l'entroterra la serie olocenica diminuisce di spessore e le sabbie litoranee superficiali passano a limi sabbiosi e argille lagunari, ad argille limose e torbe palustri o sabbie fluviali.

In figura 3 sono riportate le litostratigrafie schematiche di alcuni sondaggi ubicati lungo un profilo litorale-laguna-terraferma passante per il lido di Sottomarina.

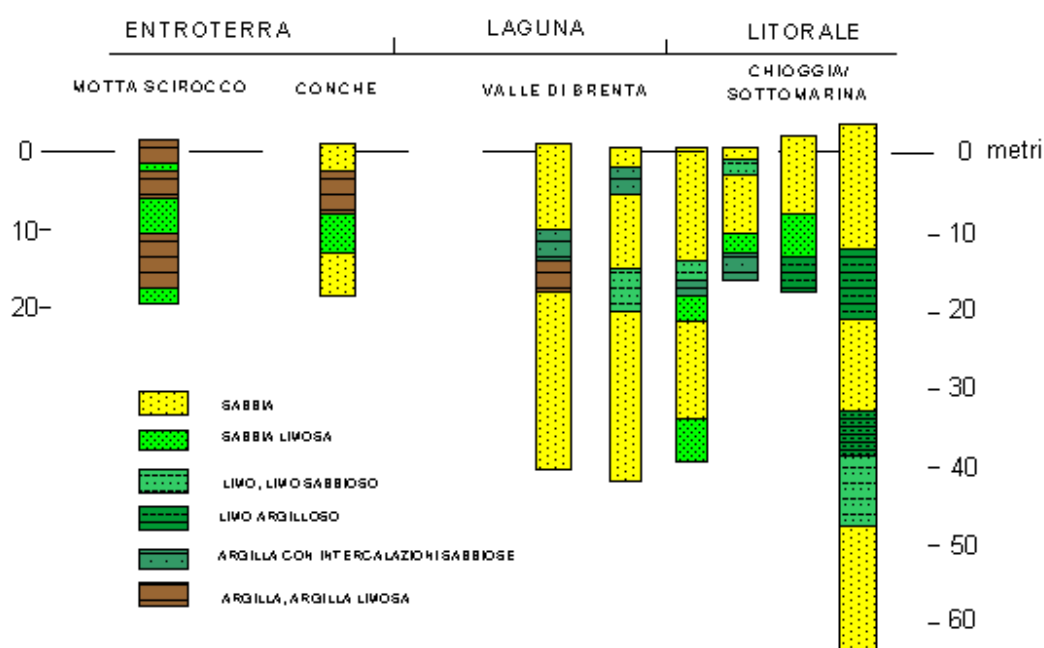


Fig. 3: stratigrafie di alcuni sondaggi ubicati lungo un profilo litorale-laguna-terraferma passante per il lido di Sottomarina

In generale, la contaminazione salina da acque marine e lagunari interessa i primi 50-70 metri, dove sono presenti le falde freatiche e semiartesiane, alimentate sia da apporti meteorici locali sia dalle acque di infiltrazione dei fiumi Adige, Brenta e Bacchiglione e di una fitta rete di canali, tra i quali i più importanti sono il Canale dei Cuori, quello di Valle e il Gorzone.

Poiché il territorio retrostante alla fascia litoranea è spesso a quota inferiore a quella del livello medio mare, con punte di oltre due metri, una serie di idrovore solleva a vari livelli l'acqua dalla rete di scolo immettendola nei canali e fiumi pensili comunicanti con il mare o la laguna.

Le linee di deflusso freatico convergono spesso ad un'idrovora principale (Bassan et al., 1994) e sono deviate dalle normali direzioni verso il mare o la laguna.

L'andamento dei livelli freatici, pur se direttamente legato alla piovosità locale, è condizionato in modo considerevole dai prelievi effettuati dalle idrovore. Si verifica spesso che i minimi livelli freatici siano raggiunti durante il periodo più piovoso quando alle idrovore è richiesta maggior attività di sollevamento per evitare alluvionamenti; mentre i più alti livelli si verificano in concomitanza della stagione secca quando alle idrovore s'impone un lavoro meno intenso.

Per quanto riguarda i terreni profondi, l'intervallo da -50 a -300 m circa costituisce il sistema acquifero differenziato composto da sei acquiferi artesiani e da altrettanti aquitard che, seppur con variazione degli spessori e delle profondità, è continuo in tutto il comprensorio veneziano (Carbognin et al., 1974; Boaretto, 1982; Teatini et al., 1995).

Le falde più superficiali di questo sistema artesiano, in particolare il primo ed il secondo acquifero (che si trovano rispettivamente tra 60-80 e 110-130 m di profondità), possono essere localmente contaminate dall'intrusione salina, in quanto i primi aquitard non sempre garantiscono l'isolamento dalle falde soprastanti.

Anche gli acquiferi più profondi, quelli al di sotto dei 200-250 m, sono soggetti a contaminazione salina; in questo caso si tratta di acque fossili presenti in tutto il comprensorio veneziano in alcuni casi già a queste profondità.

L'alimentazione del sistema artesiano è in parte "prealpina", proveniente dalla pedemontana veneta, ed in parte "alpina" proveniente dal settore sud occidentale (Bortolami et al., 1973). La variabilità delle caratteristiche idrogeologiche (permeabilità, trasmissività, porosità, ecc.) rendono gli stessi acquiferi, nei vari settori del comprensorio veneziano, più o meno ottimali allo sfruttamento idrico; nel caso dell'area di Chioggia il più produttivo e sfruttato in passato è stato il quarto.

METODOLOGIA E STRUMENTAZIONE

Per lo studio in oggetto si è applicato il metodo geoelettrico della resistività, che è basato sulla determinazione della resistività elettrica delle rocce o meglio sul contrasto di questo parametro.

La resistività di una roccia satura dipende soprattutto dalla quantità e qualità (concentrazione salina) dell'elettrolita in essa contenuto. E' evidente quindi che lo stesso tipo litologico, per esempio un livello sabbioso, può assumere valori di resistività assai diversi a seconda che sia asciutto (al di sopra del livello freatico, resistività superiore a 150-200 Ωm), con acqua dolce, o a basso tenore salino (resistività di 20-50 Ωm) oppure con acqua salata (come nel caso di un'intrusione marina, con resistività di qualche Ωm). Questa dipendenza della resistività dalla soluzione imbibente (in genere il sale dominante è il cloruro di sodio) fa sì che risulti difficile stabilire una determinata scala delle resistività che caratterizzi ogni tipo litologico: per esempio una sabbia con acqua salmastra può avere, per particolari condizioni del fluido, la stessa resistività (3-5 Ωm) di un'argilla.

E' però possibile indicare degli intervalli di valori delle resistività più probabili per ogni roccia, fermo restando comunque il principio che ogni identificazione di uno specifico tipo litologico è strettamente legata all'esperienza del geofisico ed alla conoscenza litostratigrafica locale e specifica del geologo.

La tecnica di rilevazione dei dati è eseguita utilizzando quattro elettrodi (dispositivo quadripolare) dei quali due, A e B, sono detti di energizzazione e due, M e N, di potenziale. La procedura è piuttosto semplice e consiste nell'immettere nel terreno una corrente di intensità I attraverso due elettrodi detti di energizzazione (A e B), il cui valore è letto tramite un amperometro inserito in serie nel circuito elettrodi-cavi di collegamento-generatore di f.e.m. (G)-terreno. Contemporaneamente con l'altra coppia di elettrodi (M e N, elettrodi di potenziale), è misurata, con un millivoltmetro a zero centrale ed elevata impedenza di ingresso, la differenza di potenziale ΔV , dovuta al passaggio dei filetti di corrente. Moltiplicando il rapporto $\Delta V/I$ per un coefficiente k , che dipende dalla geometria del dispositivo elettrodico ed ha le

dimensioni di una lunghezza, si ottiene un parametro, che ha le dimensioni di una resistività (Ωm), detta apparente, $\rho_a = k \Delta V / I$.

Il dispositivo quadripolare da noi utilizzato è quello Schlumberger, per il quale la distanza fra M e N è minore di un quinto della distanza tra A e B (Fig. 4).

Aumentando la distanza tra gli elettrodi di energizzazione viene progressivamente incrementata la profondità di penetrazione della corrente e, soprattutto, quella di investigazione del dispositivo. Se si considera un sottosuolo costituito da una successione di elettrostrati ciascuno con una propria resistività ρ_i , è chiaro che il valore della resistività ottenuto dalla relazione $\rho_a = k \Delta V / I$ dipende dalle resistività degli elettrostrati attraversati dai filetti di corrente. Questo valore di resistività è detto, appunto, apparente in quanto non è caratteristico di un particolare elettrostrato, bensì corrisponde ad una specie di media delle resistività degli strati attraversati.

Per effettuare l'investigazione del sottosuolo a profondità crescente è necessario eseguire una serie di misure di resistività apparente ottenuta con quadripoli per i quali aumenta progressivamente, secondo uno schema prefissato, la distanza $AB/2$.

Il circuito energizzante è costituito dal trasmettitore, dagli elettrodi A e B (per lo più di acciaio), dai cavi di collegamento, dal terreno e da un amperometro in serie che permette di misurare l'intensità I della corrente che circola.

Il circuito, potenziato è costituito dai due elettrodi M e N (generalmente di rame), da un millivoltmetro inserito tra questi e, ovviamente, dai cavi che consentono il raccordo tra i due elettrodi ed i due terminali del millivoltmetro per misurare così la differenza di potenziale ΔV tra M e N, comunemente indicata come il segnale.

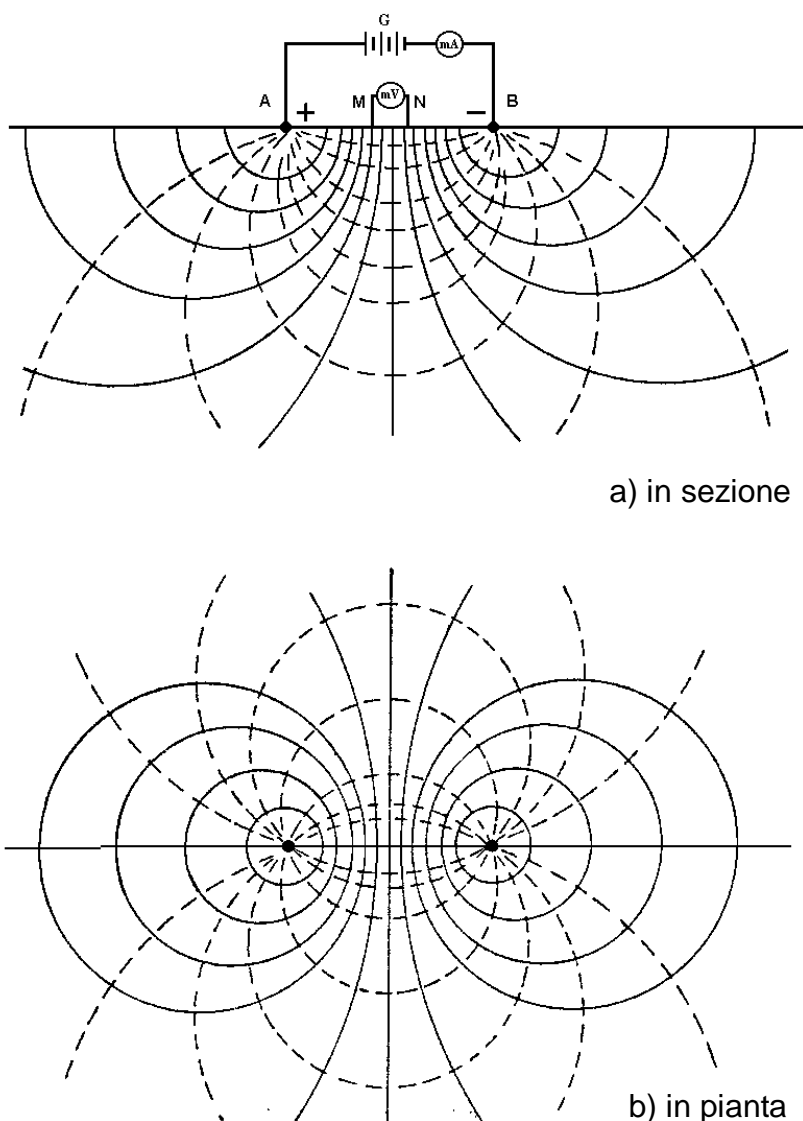


Fig. 4: schema del dispositivo quadripolare Schlumberger, dei filetti di corrente (linee tratteggiate) e delle curve equipotenziali (linee continue)

Per la campagna di misure, viste le particolari condizioni di elevata e spesso elevatissima conducibilità dei terreni investigati, è stato costruito un prototipo di apparato di energizzazione, costituito da un gruppo di continuità, commutatore-raddrizzatore, che consente di ottenere in uscita tensioni variabili da 10 a 240 V e correnti fino a 2 A. Con questo apparato il segnale è risultato sempre notevolmente più elevato del “rumore”, dovuto a correnti naturali e/o artificiali circolanti nel sottosuolo, per cui si sono considerati accettabili valori di ΔV anche inferiori a i mV.

Si riporta in figura 5 lo schema della strumentazione utilizzata.

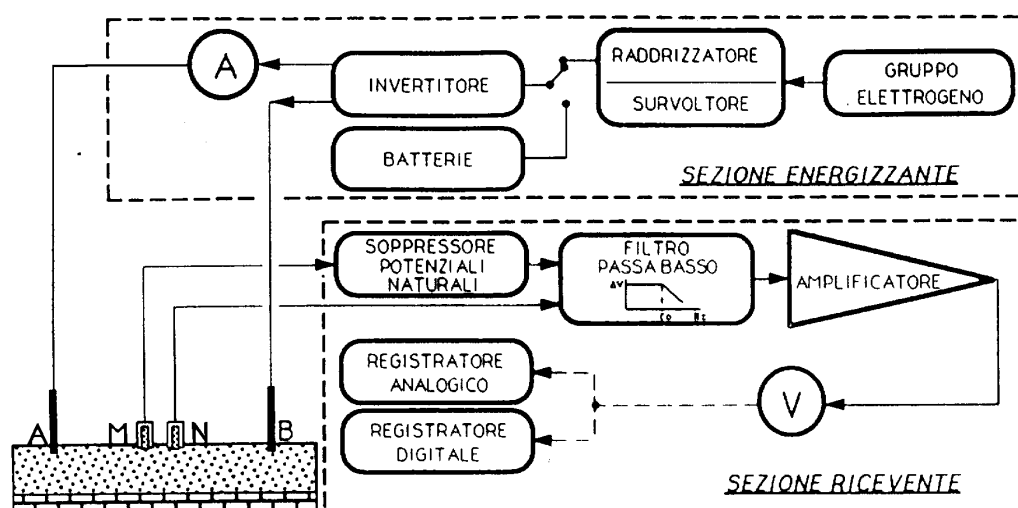


Fig. 5: schema della strumentazione utilizzata

I valori di resistività apparente ottenuti con $AB/2$ crescente vengono rappresentati in un diagramma cartesiano in coordinate bilogaritmiche: interpolando i vari punti si ottiene la cosiddetta curva di sondaggio elettrico; la sua interpretazione consiste nel ricavare da essa i parametri, spessore h_i e resistività vera ρ_i , del modello di sottosuolo stratificato in corrispondenza del quale è stata effettuata la rilevazione dei dati sperimentali.

I dati acquisiti in campagna sono stati trattati mediante un programma di inversione monodimensionale (Gandalf), e poi rielaborati con un altro programma di modellizzazione diretta (Sondelec): questo secondo passaggio permette all'interprete di scegliere una soluzione diversa da quella proposta da Gandalf una più probabile in base alle conoscenze geofisiche e geologiche della zona. Infatti è bene sottolineare che generalmente l'interpretazione delle curve di S.E.V. non è oggettiva bensì soggettiva: vale a dire data una curva sperimentale da essa si possono ricavare differenti modelli di sottosuolo, cioè differenti valori numerici di h_i e ρ_i , naturalmente con lo stesso tipo di successione elettrostratigrafica, tutti formalmente corretti, cioè compatibili con la curva stessa. Perciò nella selezione del modello ottimale o, meglio, più probabile entrano in gioco altre considerazioni oltre a quelle puramente geofisiche ed è a questo punto che la sinergia tra geofisico e geologo può dare il maggior contributo alla soluzione del problema.

LA SERIE ELETTROSTRATIGRAFICA E LE SEZIONI INTERPRETATIVE

La fase iniziale dello studio si è basata sulla rielaborazione di 23 S.E.V. eseguiti negli anni '70 alcuni con stendimenti AB superiori a 3000 m (Benvenuti et al., 1973) alla luce di informazioni stratigrafiche e geofisiche fornite sia da indagini sui pozzi profondi LIDO 1, VECNR 1, VECNR 2 e MARGHERA 1, che da altri sondaggi geognostici superficiali a quel tempo non disponibili³.

La ricerca è proseguita con l'esecuzione di 24 nuovi S.E.V. con linea di energizzazione AB compresa tra 200 e 600 m (Fig. 6) e con la verifica, attraverso confronti, della integrabilità di queste nuove indagini con quelle eseguite in passato.

Data la complessità e la variabilità della successione stratigrafica verticale e laterale e la mancanza di sondaggi geognostici eseguiti da hoc per la taratura dei S.E.V. l'elaborazione dei dati rilevati si è basata su un modello di terreno ideale a quattro strati più un quinto raggiunto solo con una decina di sondaggi con stendimenti AB maggiori di 1000 m.

Benché questo modello di successione stratigrafica semplificato sia sufficiente allo scopo di valutare l'entità del fenomeno dell'intrusione salina, non riesce a spiegare situazioni complesse come nel caso di due falde salate separate da un livello argilloso o a distinguere gli aquitard dagli acquiferi con acqua a tenore salino medio-basso.

³ Negli ultimi anni la Provincia di Venezia ha istituito un ricco catasto pozzi e sondaggi geognostici con relative stratigrafie.

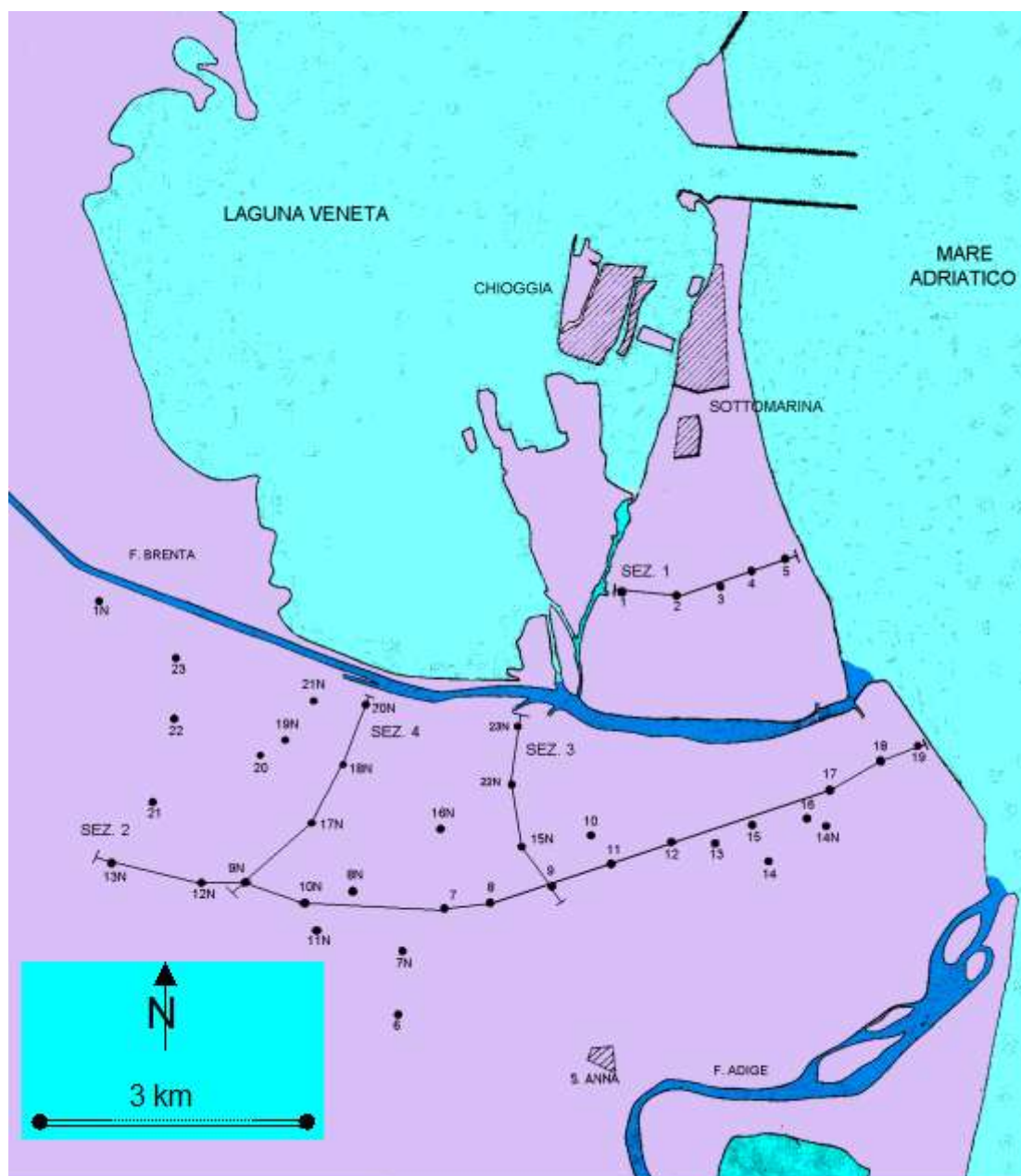


Fig. 6: ubicazione dei S.E.V. e delle sezioni elettrostratigrafiche

Dall'interpretazione congiunta delle curve di resistività dei 54 S.E.V. è stato possibile individuare una serie elettrostratigrafica composta da cinque elettrostrati di seguito descritti.

(A) elettrostrato superficiale a resistività molto variabile. In questo elettrostrato possono distinguersi diverse tipologie di terreni: A1) terreni con resistività molto elevata, maggiore di $100 \Omega m$, che corrispondono a sabbie o sabbie limose asciutte presenti soprattutto nelle zone morfologicamente più rilevate, come le dune e i cordoni litorali; A2) terreni con resistività compresa tra 20 e $50 \Omega m$, identificabili con sabbie e sabbie limose contenenti acqua a basso

contenuto salino (minore di 3 g/l); A3) terreni con resistività compreso tra 20 e 5 Ωm che corrispondono a limi argillosi sabbiosi e torbe con i valori più bassi generalmente riscontrati nelle aree di bonifica soggiate al livello mare in corrispondenza di terreni superficiali imbibiti di acqua salmastra.

(B) elettrostrato a bassissima resistività, minore di 3 Ωm) che dovrebbe identificarsi con terreni sabbiosi e sabbie limose-argillose con acqua "salata" (tenore salino maggiore di 25g/l) nei termini con resistività inferiore a 1,5 Ωm , e con acqua "salmastra" (3-25 g/l) nei termini con resistività compresa tra 1,5 e 3 Ωm .

(C) elettrostrato a bassa resistività, circa 4,5 Ωm , attribuibile sia a terreni argillosi sia a terreni limoso sabbiosi con acqua "salmastra".

Benché dal punto di vista idrogeologico questi terreni possano essere inclusi nel tetto argilloso del sistema multifalde in pressione, considerazioni di carattere stratigrafico suggeriscono anche la presenza di livelli con limi sabbiosi semipermeabilissimi contaminati dall'intrusione salina.

(D) elettrostrato da media ad alta resistività, compresa tra 15 e 80 Ωm . Questo elettrostrato è di difficile definizione perché può riferirsi ad una serie di terreni che vanno dai depositi certamente argillosi nei termini più conduttivi a quelli limosi sabbiosi nei termini più resistivi. Dal punto di vista idrogeologico e stratigrafico, questo complesso rappresenta il sistema acquifero multifalde costituito da sei acquiferi principali e dai relativi aquitard.

(E) elettrostrato profondo a bassa resistività, compresa tra 2 e 8 Ωm . Individuato attraverso una decina di sondaggi eseguiti con stendimenti AB anche maggiori di 3000 m, si trova a profondità variabile tra 250 e 450 m. I sondaggi di resistività (log elettrici) eseguiti nei pozzi VECNR 1, VECNR 2, MARGHERA 1, LIDO 1, CODEVIGO 1 (C.N.R., 1971; Ministero dei Lavori Pubblici, 1973; Alberotanza e Serandrei Barbero, 1974; Agip, 1994) e analisi chimico-fisiche confermano che la bassa resistività misurata in corrispondenza di quest'elettrostrato è imputabile alla presenza di acque salate, probabilmente di origine fossile.

Le curve di S.E.V. sono allegate a fine testo e in figura 7 vengono riportati i principali tipi (S.E.V. 4, 7, 14).

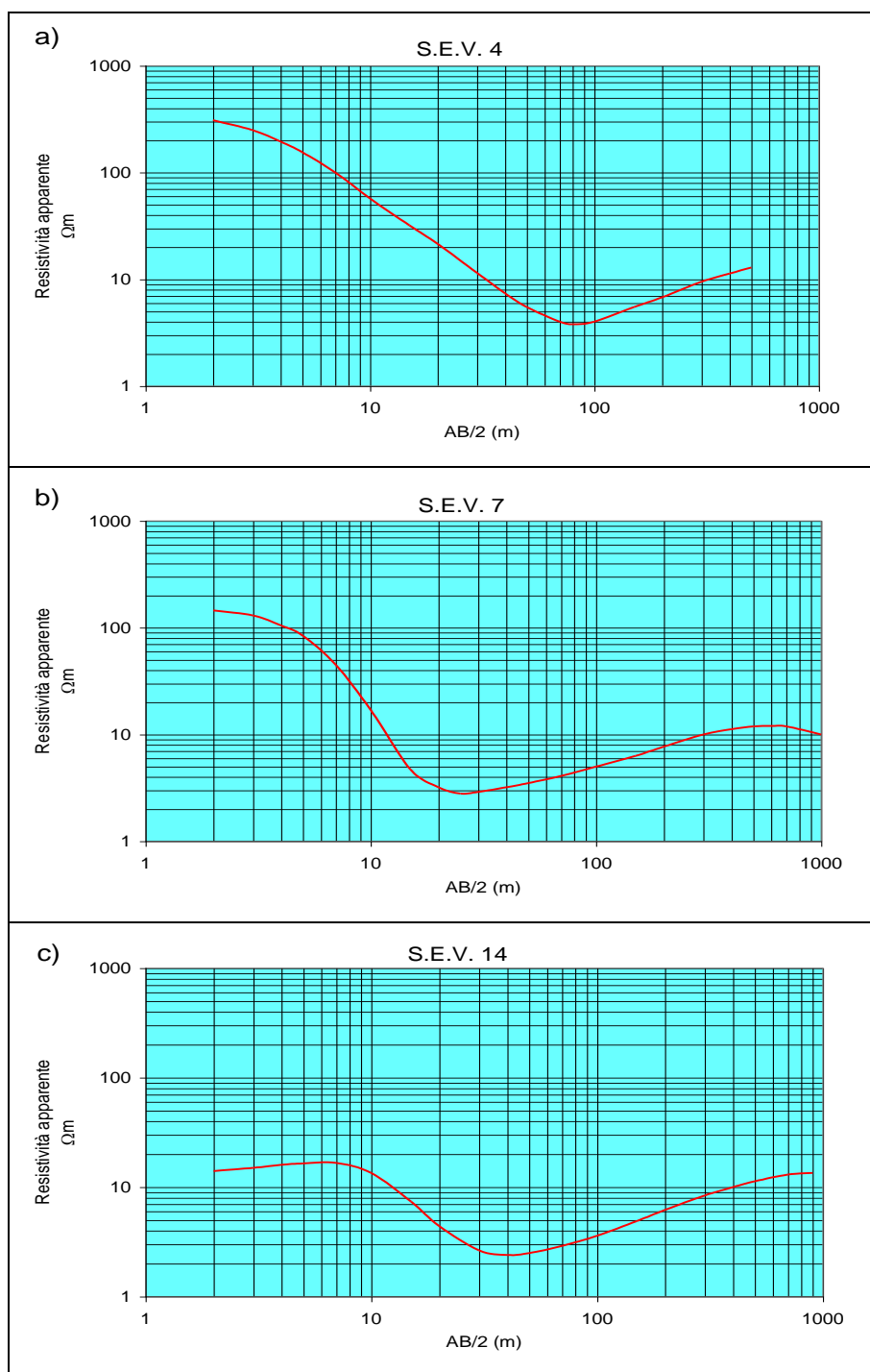


Fig. 7: principali tipi di curve di S.E.V. - a) curva a cinque terreni del tipo QHA $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 < \rho_5$; b) curva a sei terreni del tipo AHA $\rho_1 > \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 < \rho_5 > \rho_6$; c) curva a cinque terreni del tipo KHA $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 < \rho_4 < \rho_5$

Esaminiamo ora le variazioni verticali e laterali della serie sopra descritta e l'interpretazione del fenomeno dell'intrusione salina ricostruito attraverso una

serie di sezioni trasversali alla linea di costa e al margine lagunare meridionale.

La sezione 1 (Figg. 8, 9) attraversa trasversalmente il lido di Sottomarina, una lingua di terra delimitata ad Est dal mare e ad Ovest dalla laguna.

Una prima considerazione è la presenza nella falda freatica di una lente con acqua a basso contenuto salino ("dolce") identificabile nell'elettrostrato A2 (con resistività ρ compresa tra 20 e 300 Ωm), con spessore massimo, che può raggiungere circa 15 m, nella zona centrale del lido e minimo verso il mare e la laguna. Quest'acqua, intrappolata in una serie di paleocordoni litoranei sabbiosi e di dune eoliche, viene sfruttata per l'uso irriguo orticolo attraverso numerosi pozze, di diametro e profondità di qualche metro, scavate artigianalmente.

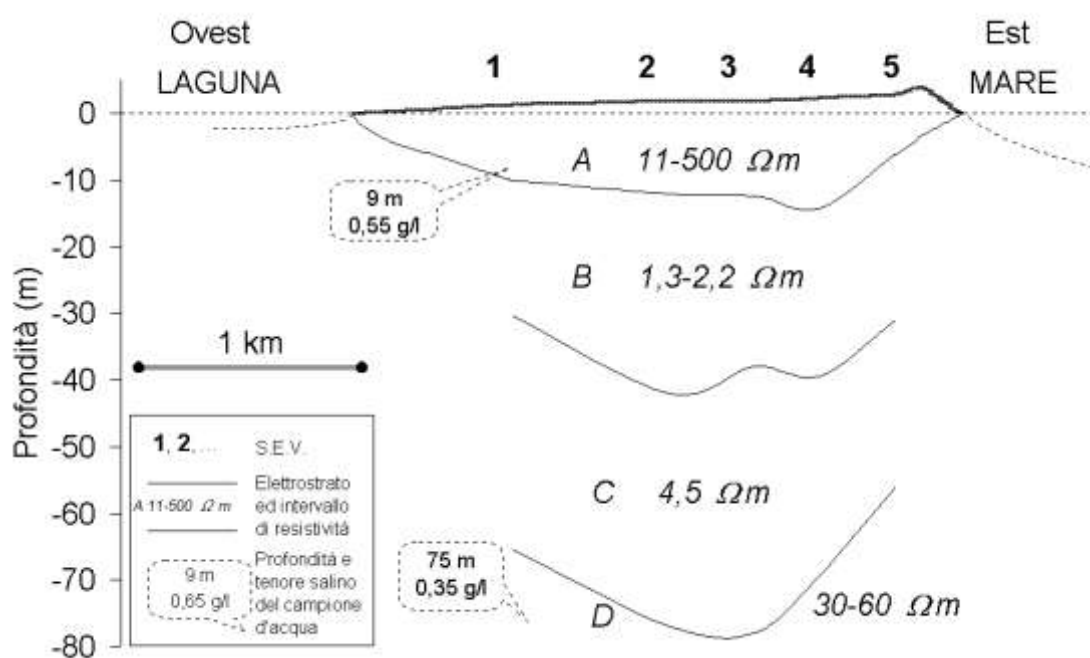


Fig. 8: sezione elettrostratigrafica 1

Sottostante questo terreno è presente l'elettrostrato conduttivo B che con la forma concava del tetto evidenzia la provenienza marina e lagunare dell'intrusione salina. Anche se l'acqua salata non sembra propagarsi nel sottosuolo oltre i 50 a 70 m non si può escludere che localmente possa raggiungere maggiori profondità e coinvolgere l'elettrostrato C.

I valori di resistività medio alti dell'elettrostrato D (compresi tra 30 e 60 Ωm) indicano la presenza di acqua dolce negli acquiferi sottostanti fino a circa 270 metri ove due sondaggi hanno individuato il tetto dell'elettrostrato conduttivo E.

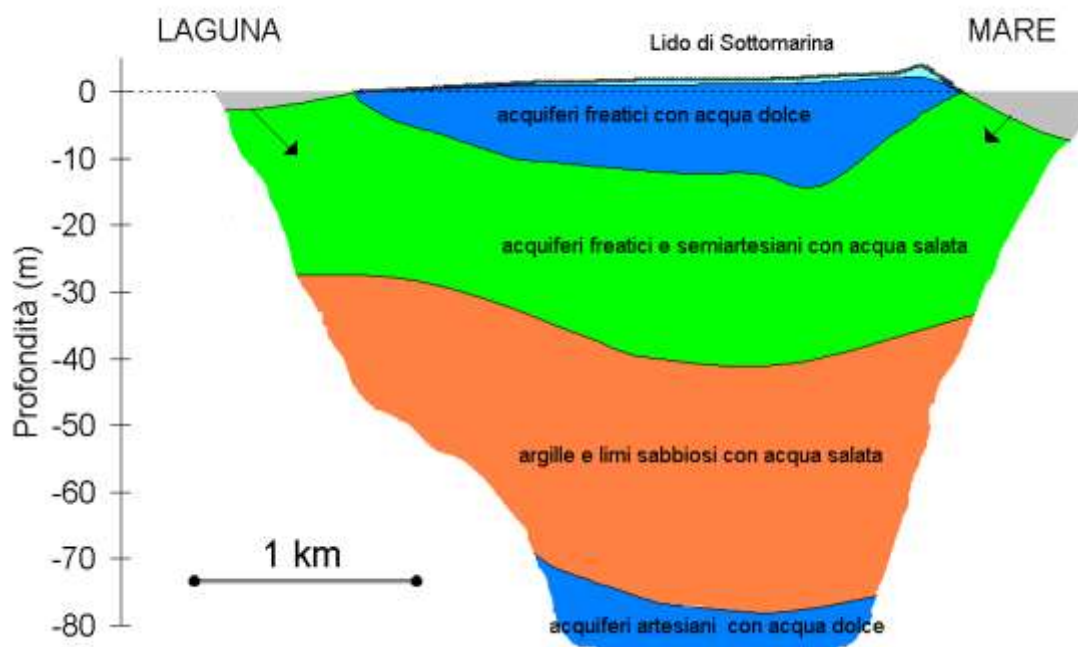


Fig. 9: rappresentazione schematica dell'intrusione salina lungo la sezione 1

La sezione 2 (Figg. 10, 11) attraversa ad est il settore costiero, costituito da allineamenti di dune e paleocordoni litorali con quote a volte superiore ai tre metri, e ad ovest le aree di bonifica, depresse fino a tre metri sotto il livello del mare.

In questa sezione le caratteristiche elettrostratigrafiche del settore litoraneo sono molto simili a quelle già descritte nella sezione 1. Anche qui l'elettrostrato resistivo (A2) indica la presenza di acqua "dolce" nella falda freatica fino ad una decina di metri.

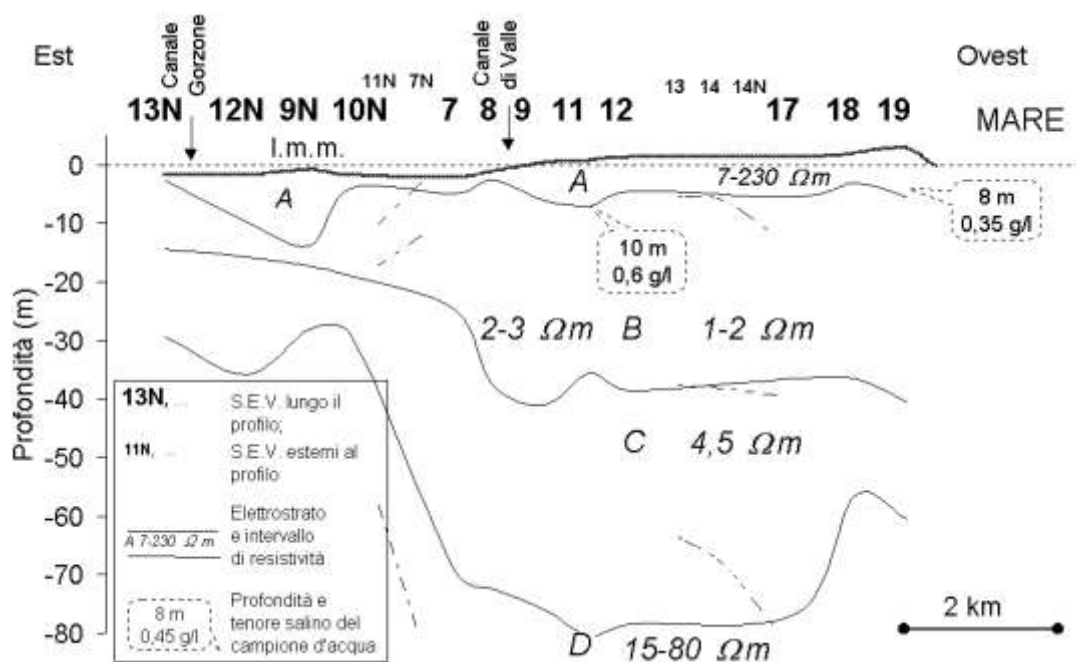


Fig. 10: sezione elettrostratigrafica 2; le linee a tratto-punto si riferiscono a S.E.V. esterni al profilo

Spostandosi verso l'entroterra lo spessore e le caratteristiche di resistività dell'elettrostrato A cambiano da A2 ad A3, sia per il passaggio da litologie prevalentemente sabbiose a quelle limo argillose con torbe sia per la salinizzazione dei terreni in prossimità delle aree depresse (risalita spontanea di acqua salata dal basso e dispersioni dalla rete idrografica pensile di acque marine e lagunari che risalgono le aste terminali).

Il sottostante elettrostrato conduttivo B ha spessore e resistività differenti: raggiunge i 40-50 m di profondità con resistività di circa 1-2 Ωm nel settore costiero, e profondità di 20-30 m con resistività di 2-3 Ωm in quello di entroterra a sud del margine lagunare.

La variazione laterale di resistività si può spiegare con una leggera diminuzione del tenore salino nei terreni identificabili con l'elettrostrato B man mano che ci si allontana dal mare; la diminuzione di spessore invece, può essere imputabile alla variazione lungo la sezione verso l'entroterra di litologia: le sabbie litorali (prevalentemente presenti nell'elettrostrato B) passano lateralmente a limi e argille lagunari o continentali (presenti nell'elettrostrato C) che per la minor permeabilità limitano la propagazione naturale dell'intrusione salina.

Il maggior spessore dell'elettrostrato C rilevato nel settore litoraneo rispetto a quello di entroterra indica la probabile presenza di livelli limo sabbiosi contaminati dall'intrusione salina purtroppo non distinguibili dalle argille al tetto e al letto di questo complesso.

Le falde in pressione con acqua dolce (elettrostrato D) si trovano sotto gli 80-100 m nel litorale e probabilmente già sotto i 40-50 m nell'entroterra. Infine la presenza di acque salate fossili, elettrostrato conduttivo E, è stata individuata già a partire da circa 200 m (200-450 m).

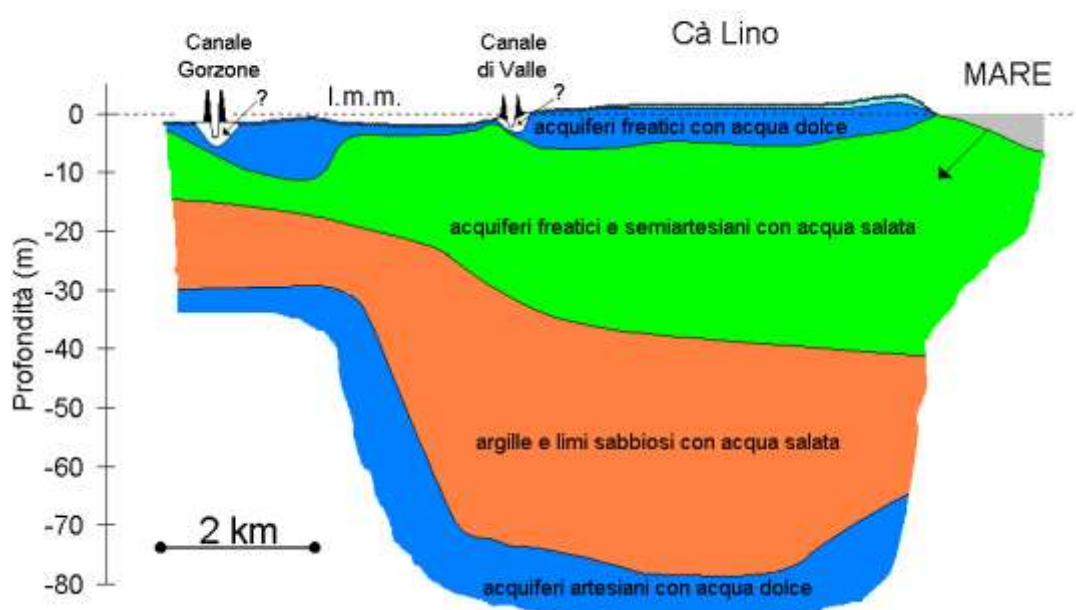


Fig.11: rappresentazione schematica dell'intrusione salina lungo la sezione 2

Per verificare il contributo lagunare all'intrusione salina sono state eseguite due sezioni trasversali il margine lagunare e passanti per l'entroterra soggiacente il livello medio mare (sezioni 3 e 4).

La sezione 3 (Figg. 12, 13) evidenzia la situazione di estrema gravità del fenomeno dell'intrusione salina in questo settore. E' interessante notare che nonostante la presenza dei fiumi Brenta-Bacchiglione e del Canale Gorzone la presenza dell'elettrostrato A è limitata a meno di un metro di spessore. In particolare i suoi bassi valori di resistività, compresi tra 7 e 10 Ωm (A2-A3), indicano che la falda freatica dolce è praticamente assente e l'intrusione salina (elettrostrato B) può coinvolgere direttamente il suolo coltivato. Anche

se l'elettrostrato B sembra raggiungere i 30-40 m di profondità, probabilmente parte dell'elettrostrato C è contaminata dalle acque saline e le falde con acqua dolce sono al di sotto di 70-80 m.

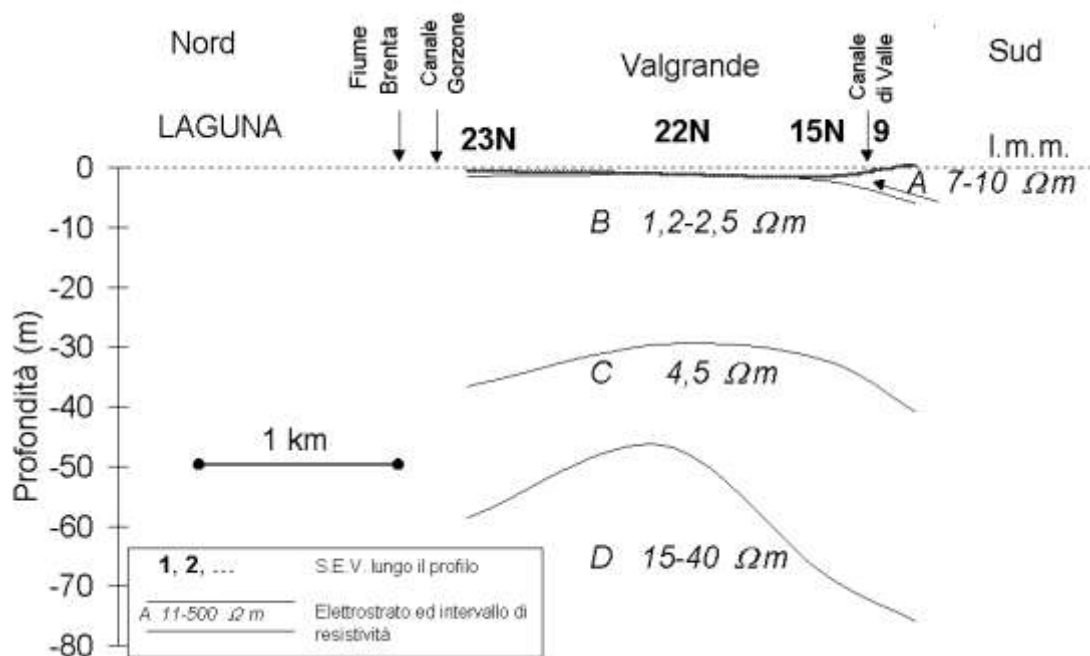


Fig. 12: sezione elettrostratigrafica 3

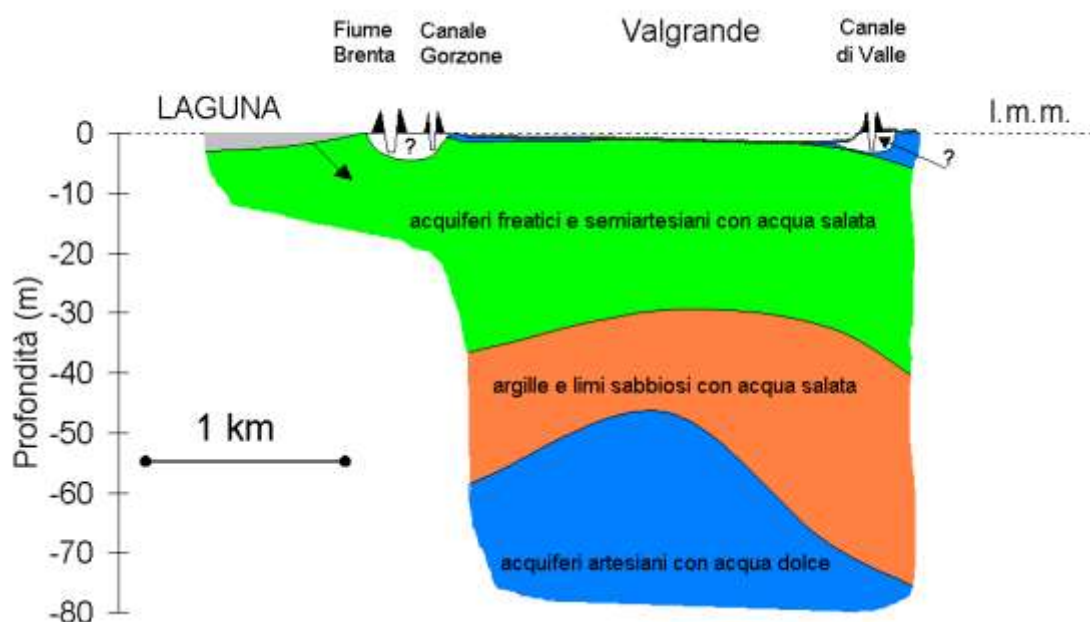


Fig.13: rappresentazione schematica dell'intrusione salina lungo la sezione 3

La sezione 4 (Figg. 14, 15) viceversa, evidenzia la presenza di acqua "dolce" nella falda freatica (elettrostrato A2) con uno spessore che da meno di un

metro in prossimità del margine lagunare e del Fiume Brenta-Bacchiglione aumenta spostandosi verso l'entroterra e passando sotto il Canale Gorzone fino ad una decina di metri.

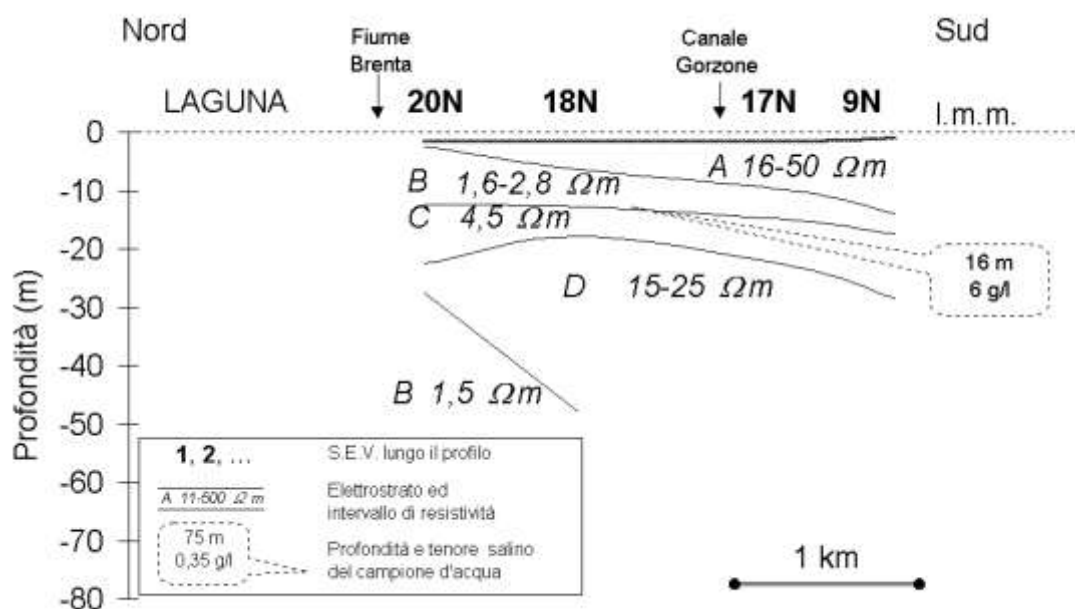


Fig. 14: sezione elettrostratigrafica 4

L'intrusione salina lagunare sembrerebbe confinata dal sottostante elettrostrato C a 20-30 m di profondità ma, in corrispondenza dei due S.E.V. più settentrionali (20N e 18N), è stato individuato un secondo elettrostrato conduttivo di tipo B. Purtroppo la mancanza di ulteriori S.E.V. ed in particolare di sondaggi geognostici eseguiti in corrispondenza dei rilievi geoelettrici non consente, allo stato attuale dello studio, una definizione più accurata del fenomeno della contaminazione salina e dei meccanismi che la causano siano essi naturali e/o indotti da attività antropica.

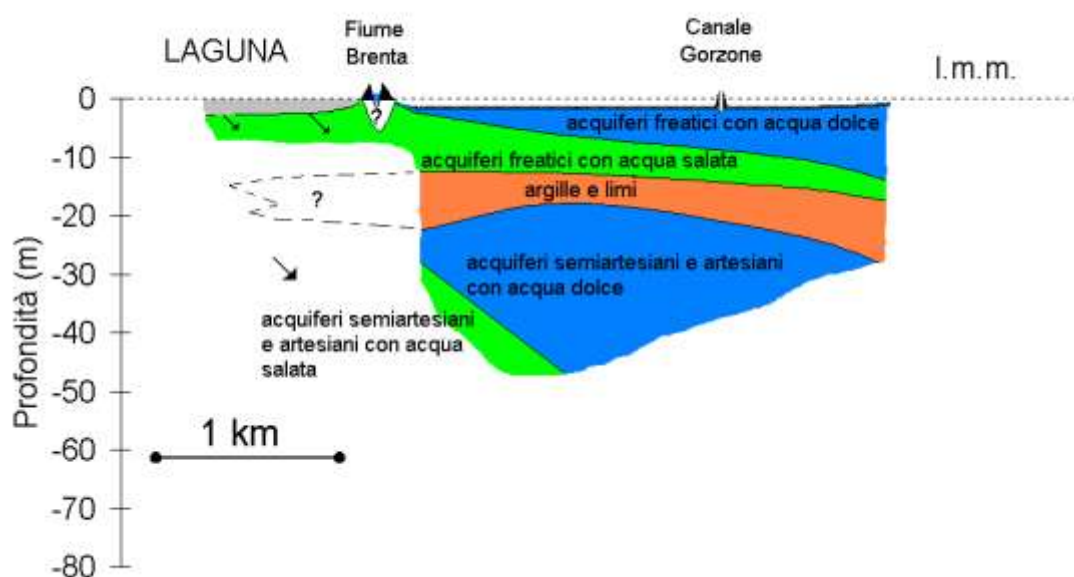


Fig.15: rappresentazione schematica dell'intrusione salina lungo la sezione 4

CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Lo studio del fenomeno dell'intrusione salina nel sottosuolo del comprensorio veneziano mediante l'uso di metodologie geofisiche iniziato nei primi anni settanta, è stato qui ripreso, per il settore settentrionale del Comune di Chioggia, e integrato con l'esecuzione di nuovi sondaggi elettrici verticali.

L'elaborazione e l'interpretazione di 47 S.E.V. hanno consentito una caratterizzazione elettrostratigrafica del sottosuolo e una prima valutazione dell'estensione della contaminazione salina.

In generale è stato possibile riconoscere una successione verticale costituita da 5 elettrostrati (di seguito indicati dall'alto verso il basso):

(A) elettrostrato superficiale a resistività variabile, suddivisibile in A1, sabbie asciutte (maggiore di 100 Ωm), A2 sabbie più o meno limose e sature con acqua dolce (tra 20 e 50 Ωm) e A3 limi sabbiosi e argillosi (tra 20-5 Ωm);

(B) elettrostrato a bassissima resistività (minore di 3 Ωm) che indica terreni con acqua salata o salmastra;

(C) elettrostrato a bassa resistività (circa 4,5 Ωm) che generalmente identifica il tetto argilloso del sistema acquifero in pressione;

(D) elettrostrato con resistività da media ad alta, (tra 15 e 80 Ωm , caratterizzante i terreni del sistema multifalde artesiano (acquiferi e aquitard);
(E) elettrostrato a bassa resistività (2-8 Ωm) che indica la presenza di acque salate anche nei terreni profondi (200-500 m), probabilmente di origine fossile.

Dalle sezioni elettrostratigrafiche ortogonali alla linea di costa e al margine lagunare appare evidente la presenza dell'intrusione salina proveniente da entrambi questi ambienti.

La prima ricostruzione del fenomeno dell'intrusione salina, ha indicato che la contaminazione interessa con modalità differenziate i terreni della fascia litoranea e quelli di entroterra.

Nel settore costiero, le dune ed i cordoni litoranei costituiscono una falda di acqua "dolce" con spessore di circa 5-10 m e l'intrusione salina coinvolge i terreni sottostanti anche fino a 60-70 m di profondità.

Procedendo verso l'entroterra invece, la situazione è in generale più grave in superficie, in quanto a volte la falda "dolce" freatica presenta spessori ridottissimi o addirittura nulli e permette all'intrusione salina di raggiungere i terreni coltivati. Per contro, a partire da circa 30-40 m, la contaminazione sembra attenuarsi con l'aumentare della profondità; in ogni caso non si possono escludere locali propagazioni fino a 60-70 m.

L'intrusione salina, generalmente regolata dai naturali contrasti di densità delle acque dolci di falda e quelle saline marine-lagunari nonché dai rapporti dei relativi carichi idraulici che ne determinano le caratteristiche geometriche dell'interfaccia che le separa, è favorita in quest'area da una serie di fattori. Nelle aree soggiacenti il livello marino i pompaggi effettuati dalle idrovore per mantenere il franco di bonifica richiamano le sottostanti acque saline che contaminano lo strato coltivato. Inoltre la presenza di una rete idrografica in comunicazione col mare e la laguna, spesso con caratteristiche pensili, costituisce veicolo di trasporto, ed in alcuni tratti di dispersione, delle acque saline che risalgono le aste terminali dei canali e fiumi in relazione alle fasi di marea.

Per concludere, questo studio ha evidenziato che il problema dell'intrusione salina nel comune di Chioggia, per l'estensione territoriale e per le tipologie di

terreni interessati, è un fenomeno particolarmente allarmante e si ritiene doveroso approfondirne le conoscenze secondo le seguenti linee:

- ampliare l'area di indagine verso l'entroterra e lungo il margine lagunare;
- eseguire una serie di carotaggi geognostici profondi, almeno fino ad un centinaio di metri, per affinare l'interpretazione dei dati geofisici;
- integrare lo studio con misure di salinità in pozzi freatici ed artesiani;
- definire la dispersione di acqua salata dai corsi d'acqua in comunicazione col mare o laguna alle falde superficiali;
- istituire una rete di pozzi-piezometri per il monitoraggio della salinità dell'acqua;
- estendere lo studio alle falde profonde al limite con le acque fossili;
- elaborare un modello matematico di simulazione del fenomeno di intrusione salina.

Ringraziamenti

Gli Autori desiderano ringraziare la Dott. Laura Carbognin, dell'Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse del CNR per i consigli nella fase di interpretazione dei risultati; il Dott. Andrea Vitturi, responsabile del Servizio Programmazione Ambientale e Protezione Civile, Settore Ecologia e Ambiente della Provincia di Venezia, per aver fornito i dati inediti di salinità delle acque; i Sig.ri Ugo Brocca e Giancarlo Dalmissier dell'Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse del CNR nonché il Sig. Giampaolo Girardi del Dipartimento di Geologia, Paleontologia e Geofisica dell'Università di Padova e il Dott. Andrea Toniolo per la preziosa assistenza tecnica.

BIBLIOGRAFIA

AGIP, 1994, Acque dolci sotterranee. Inventario dei dati raccolti dall'AGIP durante la ricerca di Idrocarburi in Italia (dal 1971 al 1990). Agip spa - Direzione Generale Servizi Centrali per l'Esplorazione.

ALBEROTANZA L. e SERANDREI BARBERO R., 1974, Rapporto preliminare sul sondaggio VE 2 CNR. Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Tech. Rep. 87, C.N.R., Venezia.

BENVENUTI G., NORINELLI A. e ZAMBRANO R., 1973, Contributo alla conoscenza del sottosuolo dell'area circumlagunare veneta mediante sondaggi elettrici verticali. Boll. Di Geofisica Teor. e Appl., XV, 57, 23-38.

BASSAN V., FAVERO V., VIANELLO G. e VITTURI A., 1994, Studio geoambientale e geopedologico del territorio provinciale: parte meridionale. 261 p., 20 tav., Provincia di Venezia.

BOARETTO C., 1982, Studio sull'eventuale relazione tra lo sfruttamento idrico sotterraneo e la subsidenza nell'area compresa tra Piove di Sacco e Chioggia. Tesi di laurea. Istituto di Geologia, Univ. di Padova. Rel.: R. Antonelli e P. Gatto. Anno Acc. 1982-1983.

BONARDI M. e TOSI L., 1994, Effects of Late Quaternary climatic changes on an exposed clay layer in the Lagoon of Venice (Italy). International Association of Sedimentologist. Proceedings of 14th International Sedimentological Congress, Recife 1994, Brazil, D18-20.

BONARDI M. e TOSI L., 1995a, The Holocene-Pleistocene boundary zone in the Lagoon of Venice (Italy). Atti del Contributo Italiano al Seminario Bilaterale Cina-Italia sulla Geologia Marina, 4-6 Ottobre 1994 Quingdao, China. Istituto di Geologia Marina, C.N.R., Rapporto Tecnico N. 40, 14-17, Bologna.

BONARDI M. e TOSI L., 1995b, Caratterizzazione e differenziazione mineralogica dei livelli sabbiosi tardo quaternari del litorale veneziano. Il Quaternario, Italian Journal of Quaternary Sciences, Vol. 8, fasc. 2, pp. 315-322.

BORTOLAMI G., FONTES J.Ch. e PANICHI C., 1973, Isotopes du milieu et circulations dans les aquifers du sous-sol vénitien. Earth and Planetary Sciences Letters, 19, 2, 154-167.

CARBOGNIN L., GATTO P. e MOZZI G., 1974, Situazione idrogeologica del sottosuolo di Venezia - Ricostruzione degli acquiferi soggetti a sfruttamento sulla base dei dati relativi ai pozzi artesiani. Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Tech. Rep. 32, CNR, Venezia.

CARBOGNIN L., GATTO P. , MOZZI G., GAMBOLATI G. e RICCERI G., 1977, New trend in the subsidence of Venice. In «Land Subsidence» (Proc. 2nd Int. Symp. on Land Subsidence, Anaheim, December 1976), ed. J.C. Rodda, IAHS Publ. no. 121, 65-81.

CARBOGNIN L., GATTO P., e MOZZI G., 1981, La riduzione altimetrica del territorio veneziano e le sue cause, Istituto Veneto di Lettere Scienze ed Arti, «Rapporti e Studi», Vol. VIII, 55-83.

CARBOGNIN L., 1987, Venezia, La Sua Laguna, I Suoi Problemi. Atti. del VI Congresso Nazionale dell'Ordine dei Geologi, Venezia, Fondazione Cini, 240-255.

CARBOGNIN L., MARABINI F., TARONI G., TEATINI P. e TOSI L., 1994, Altimetria recente del comprensorio lagunare veneziano. Un'analisi critica. Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Tech. Rep. 193, CNR, Venezia.

CARBOGNIN L. e TOSI L., 1995, Situazione altimetrica attuale del comprensorio veneziano e i suoi riflessi sull'ambiente lagunare. Geologia Applicata e Idrogeologia, ed. Cotecchia, Vol. XXX, 303-313.

CARBOGNIN L., TEATINI P. e TOSI L., 1995a, Analysis of actual land subsidence in Venice and its hinterland. Land Subsidence. Fifth International Symposium On Land Subsidence, Oct. 16-20, 1995, The Hague, The Netherlands. Barends, Brouwer & Schroeder (eds) Balkema, Rotterdam, 129-137.

CARBOGNIN L., MARABINI F. e TOSI L., 1995b, Land subsidence and degradation of the venetian littoral. Land Subsidence. Fifth International Symposium On Land Subsidence, Oct. 16-20, 1995, The Hague, The Netherlands. Barends, Brouwer & Schroeder (eds) IHAS Publ. 234, 391-402.

C.N.R., 1971, Relazione sul Pozzo VE 1 CNR. Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Tech. Rep. 14-21, C.N.R., Venezia.

GATTO P. e PREVIATELLO, 1974, Significato stratigrafico, comportamento meccanico e distribuzione nella laguna di Venezia di un'argilla

sovracconsolidata nota come "caranto". Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Tech. Rep. 70, CNR, Venezia.

GATTO P., PREVIATELLO P., CARBOGNIN L. e MOZZI G., 1976, Note illustrative sul sottosuolo delle bocche della laguna di Venezia. Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Tech. 67, CNR, Venezia.

GATTO P. e CARBOGNIN L., 1981, The lagoon of Venice: natural environmental trend and man-induced modification,. «Hydrological Sciences Bull.», Vol. 26, no. 4, 379-391.

GATTO P., 1980, Il sottosuolo del litorale veneziano. Istituto per lo Studio della Dinamica delle Grandi Masse, Tech. Rep. 108, CNR, Venezia.

MINISTERO LAVORI PUBBLICI, 1973, Pozzi Lido 1 e P. Marghera 1. Comitato per lo studio dei Provvedimenti a Difesa della Città di Venezia, III gruppo di lavoro, fascicolo con allegati.

MINISTERO LAVORI PUBBLICI, 1974, Ricerche stratigrafiche superficiali e di falde acquifere mediante sondaggi elettrici a sud-ovest della laguna di venezia. A cura di Benvenuti G. Comitato per lo studio dei Provvedimenti a Difesa della Città di Venezia, III gruppo di lavoro.

TEATINI P., GAMBOLATI G. e TOSI L., 1995, A New 3-D Non-linear Model of the Subsidence of Venice. Land Subsidence, Fifth International Symposium On Land Subsidence, Oct. 16-20, 1995, The Hague, The Netherlands. Barends, Brouwer & Schroeder (eds) IHAS Publ. 234, 353-361.

TOSI L., 1994a, I sedimenti tardo quaternari dell'area litorale veneziana: analisi delle caratteristiche fisico-meccaniche. Geologia Tecnica ed Ambientale, 2, 47-60.

TOSI L., 1994b, L'evoluzione paleoambientale tardo quaternaria del litorale veneziano. Il Quaternario-Italian Journal of Quaternary Sciences, Vol. 7, fasc. 2, 589-596.